CN 53-1189/P ISSN 1672-7673

2 840 MHz 太阳射电辐射流量计的升级改造*

杜 静[1,2]，颜毅华[1]，徐之材[3]，殷兴辉[4]，王 威[1]，谭程明[1]，陈志军[1]

(1. 中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室，北京 100012；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 南京射电天文技术研究所，江苏 南京 210024；4. 河海大学，江苏 南京 211100)

摘要：叙述了国家天文台升级改造后的 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计的设计特点、性能、结构及观测结果。升级改造后的太阳射电辐射流量计将在较高时间分辨率上实时得到 2 840 MHz 频率上的太阳流量，为太阳物理研究积累丰富的观测数据，是太阳活动监测和预报的重要参数之一。

关键词：射电天文；太阳射电辐射流量计；流量观测；辐射计

中图分类号：P111.44　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7673(2016)01-0052-06

太阳微波辐射流量与黑子相对数、耀斑爆发、X 射线爆发以及高能电子质子事件均有一定的关系[1]，而 2 840 MHz(波长为 10.7 cm)的太阳射电辐射流量与黑子相对数及高能电子和质子事件的关系最为密切，是地球空间物理的重要输入参数。因此，2 840 MHz 的射电辐射流量监测对研究太阳活动规律、太阳长期演化行为，建立更加完善的太阳活动预报模型以及太阳射电天文学的发展等具有极其重要的意义。国家天文台怀柔 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计长期参与国际联网观测，连续三十多年为国际太阳和地球物理数据中心提供观测数据，为国际太阳活动预报提供可靠的数据支持。文[2]利用怀柔 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计的长期观测数据研究太阳活动周的相似性行为，并预测第 24 活动周的开始时间和最大活动强度。文[3]利用 2 840 MHz 射电辐射流量的长期观测数据研究了太阳长期活动行为，发现太阳活动的中短时间尺度的周期性与太阳系行星运动之间有较强的相关性。同时，2 840 MHz 太阳射电辐射流量计也是中国空间环境监测网的重要组成部分，为国家航空航天任务提供空间环境保障发挥了重要作用。

2 840 MHz 太阳射电辐射流量计位于国家天文台怀柔太阳观测基地怀柔水库北岸，距离北京市中心约 60 km，北纬 40.3°，东经 116.6°，海拔高度 64 m。附近有较强的机场雷达信号干扰，但干扰信号特征明显，数据处理过程中，可通过成熟的数据处理方法予以剔除。21 世纪初，该设备由于长年运行，多数元器件老化停止了观测，考虑到 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计是国内唯一的单频射电辐射流量计及其在太阳活动研究方面的重要意义，经过充分调研，对 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计进行了升级改造。新设备对包括微波前端(从低噪放开始)、模拟接收系统、数字采集系统、存储及显示系统都进行了升级改造，天线采用 2 m 抛物面反射面天线，赤道式装置。同时，采用了 K 因子辐射计和新的定标技术，使得定标更加高效，定标结果更加精确可信[4]。目前，该设备已获取了一些良好的观测结果。

1 系统指标

太阳射电望远镜系统是自动化程度较高的空间探测装备，具有定标系统、自动采集观测数据、自动生成和传送设备，同时具有较高的可靠性、稳定性，能全天候长期、连续地运行。系统指标如表 1。

---

* 基金项目：国家自然科学基金 (11103044, 11273030, 11221063, 11433006)；科技部科学基础性工作专项 (2014FY120300) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2011CB11401) 资助.
收稿日期：2015-03-28；修订日期：2015-04-16
作者简介：杜 静，女，博士. 研究方向：太阳射电. Email：jdu@nao.cas.cn

表 1　2 840 MHz 太阳射电辐射流量计系统指标

Table 1　The system specifications of the upgraded Solar Radio Flux Telescope working at 2840MHz

工作频率 /MHz	灵敏度 /sfu	输出中频带宽 /MHz	时间分辨率 /ms	噪声系数 /dB	输出功率 /dBm	步进衰减器范围 /dB
2 840	≤1	10	1	≤3	≥10	0~31

2　系统结构

2 840 MHz 太阳射电辐射流量主要用于太阳活动长期行为的研究和太阳预报，对测量精度和数据的稳定性要求很高，因此，在本次升级改造过程中采用镜像抑制的超外差式接收机方案，可很好地抑制干扰，选用 K 因子辐射计保证仪器的灵敏度和稳定性。同时，近年来关于太阳活动的短期行为也不断受到太阳物理学家的高度重视，而 2 840 MHz 太阳射电流量有最灵敏的响应，因此，为了满足这方面的科学需求，采用了衰减器和对数放大器 2 种方法以提高数据的动态范围。系统结构如图 1。

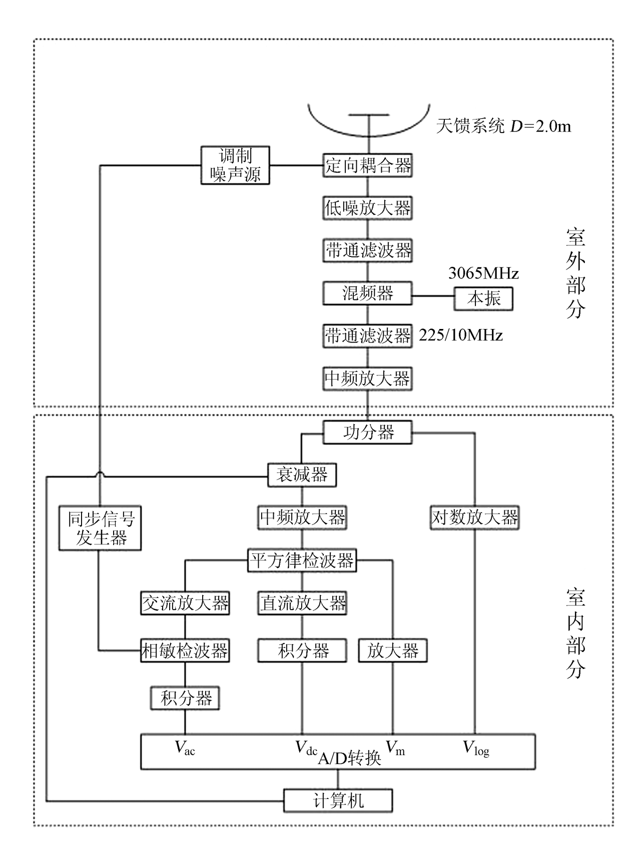


图 1　2 840 MHz 太阳射电辐射流量计方框图

Fig. 1　The block diagram of the upgraded Solar Radio Flux Telescope working at 2840MHz

3　系统特点

3. 1　良好的抗干扰设计

采用镜像抑制的超外差式接收机，在混频器前加 2 840 MHz 的声表面带通滤波器，选用较高中频 f_o = 225 MHz，中频带宽 BW_{IF} = 10 MHz，采用 BW/f_o = 5% 的声表面带通滤波器，矩形系数接近 1，带外衰减大，对镜频可抑制 20~30 dB，从而有效抑制镜频干扰和带外干扰，保证观测数据的可靠性。同时，采用合理的微波放大器，有效抑制交调互调干扰信号的产生，采用良好的电磁兼容性设计，防止干扰信号寄生耦合到信号通道。模数转换器放在接收机机箱内，与低放输出短线相接，减小 50 Hz 等低频干扰。

3. 2　大动态范围

采用衰减器和对数放大器 2 种方法扩大测量动态范围的技术，构成 2 个并行输出的信号。衰减器法采用 1 dB 步进的最大衰减量为 31 dB 的数控步进衰减器，用它调整中频输出信号电平，数控步进衰减器由计算机自动控制[5]。衰减器法测宁静太阳和小爆发的精度较高，但观测大爆发时由于衰减量变化，产生观测数据的跳变，虽然计算处理后能恢复连续变化特性，但精度有所下降。对数放大器法可获得连续变化的记录，特别适用于记录大爆发，精度可达 0. 2 dB。

3. 3　采用 K 因子辐射计

K 因子辐射计是根据德国天文学家 Keen 提出的 K 因子测量原理而发展的新型辐射计，其信号路工作在全功率计状态，灵敏度高。采用天线温度定标的噪声源与 K 因子辐射计调制式噪声源合一的方案，通过测量定标常数 C_s 对系统进行定标，实现观测与温度标定同时自动进行，提高了标定精度[6-7]。升级改造后的 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计采用 K 因子式辐射计，其原理图如图 2，图中对应部件代码和符号见表 2。

表 2 原理图中的部件代码和符号

Table 2 The component codesand symbols in the block diagram

部件代码或符号	A	MNS	RF/IF	⧐	DC	AC	PD	⊓⊔
说明	天线	被调制噪声源	高中频单元	平方律检波器	直流放大器	交流放大器	相敏检波器	同步信号源

代码	T_a	T_r	$2\Delta T$	G_e	k_{DC}	k_{AC}	V_{DC}	V_{AC}
说明	天线 T	接收机 T	噪声源交变量峰峰值	RF/IF 等效增益	直流路放大量	交流路放大量	直流路输出	交流路输出

3.3.1 K 因子辐射计的基本关系

K 因子辐射计天线口面的噪声分量和时变状态如图 3。直流分量 $\bar{T} = T_a + T_r + \Delta T$，交流分量 ΔT。

采用理想平方律检波器，且放大器工作在线性态时，V_{DC}和 V_{AC}两路输出与 T_a、T_r 和 ΔT 的关系[8-9]：

$$V_{DC} = koG_e k_{DC}(T_a + T_r + \Delta T), \quad (1)$$

$$V_{AC} = koG_e k_{AC}\Delta T. \quad (2)$$

K 因子定义：$K = V_{DC}/V_{AC}$，将(1)、(2)代入上述关系式，得：$K = (T_a + T_r + \Delta T)/C$，式中：

$$C = \Delta T k_{AC}/k_{DC},$$

故 $T_a = CK - T_r - \Delta T$。

3.3.2 用 K 因子辐射计观测射电源

(1)对准射电源时：得到的 K 因子为 K_s，此时，$T_a = T_s + T_b$，$T_s + T_b = CK_s - T_r - \Delta T$。

(2)对准射电源背景时：得到的 K 因子为 K_b，此时，$T_a = T_b$，$T_b = CK_b - T_r - \Delta T$。

以上两式相减得到：

$$T_s = C(K_s - K_b). \quad (3)$$

T_s 为天线温度中射电源分量；T_b 为天线温度中背景噪声温度分量。

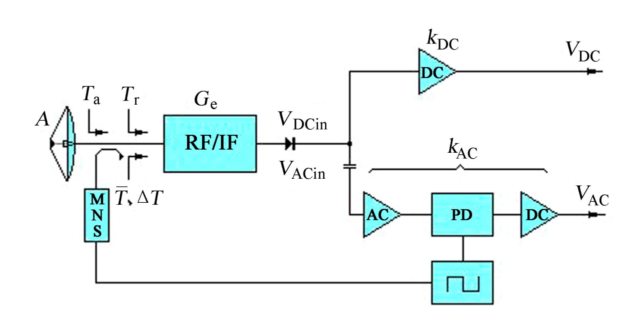


图 2 K 因子辐射计原理图

Fig. 2 The block diagram of the radiometer for the K-factor measurement

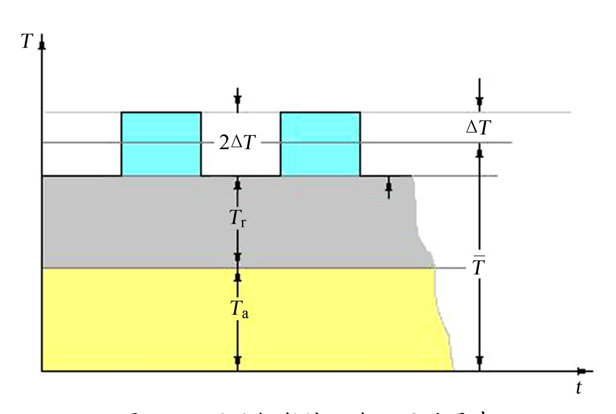


图 3 K 因子辐射计天线口面的噪声分量和时变状态图

Fig. 3 The diagram of the noise components and time varying state for the antenna of the radiometer with the K-factor measurement

3.3.3 定标常数 C_s：

当天线的波束宽度远大于射电源视角径时，$T_s = A_e S/2k$， (4)

A_e 为天线的有效接收面积；k 为玻尔兹曼常数。

结合(3)、(4)两式：

$$C(K_s - K_b) = A_e S/2k,$$

由此可得到：

$$S = C_s(K_s - K_b), \quad (5)$$

$$C_s = 2kC/A_e = S/(K_s - K_b). \quad (6)$$

实际操作中，首先采用其它射电望远镜获得太阳等射电源流量 S，然后分别对太阳和背景进行观测获得 K_s 和 K_b，相对测量的望远镜与它比对后，依据(6)式可获得定标常数 C_s。将 C_s 数值输入定标

软件中作为配置参数使用，之后分别对背景和太阳进行观测，依据(5)式即可获得太阳流量值，相对测量转换为绝对测量。

4　系统性能

4.1　灵敏度

在射电天文观测中，灵敏度是射电望远镜的重要指标，决定了接收系统检测弱信号的能力，定义为“最低可测”的辐射流量密度 S_{min}[1,10]。

宁静太阳射电辐射流量：$S = 80$ sfu①

天线有效面积：$A_e = \eta\pi d^2/4 = 2.67\ \mathrm{m}^2$，式中，天线直径 $d = 2$ m；天线效率 $\eta = 85\%$

天线温度的太阳分量：$T_s = A_e S/2k = 2.67 \times 80 \times 10^{-22}/(2 \times 1.38 \times 10^{-23}) = 774$ K

辐射计的工作参数见表 3。

表 3　K 因子辐射计的工作参数

Table 3　The working parameters of the radiometer with the K-factor measurement

参数名	天线温度的太阳分量	天线温度的背景分量	接收机噪声温度（NF = 3 dB）	馈线插损	带宽	时间常数	工作温度	辐射计注入噪声
符号	T_s	T_b	T_r	L_i	BW	τ	T_o	ΔT
参数值	774 K	30 K	290 K	0.89(−0.5 dB)	10 MHz	1 s	290 K	290 K

K 因子辐射计理论灵敏度（$S/N = 1$）：总插损 $L_i = 0.89$

天线温度：$T_a = T_s + T_b = 804$ K

系统噪声温度：

$T_{sys} = L_i T_a + (1 - L_i) T_o + T_r + \Delta T = 0.89 \times 804 + (1 - 0.89) \times 290 + 290 + 290 = 1\,327$ K

噪声起伏：$\Delta T_{min} = T_{sys}/(2Bw\tau)^{1/2} = 0.297$ K/Hz

系统灵敏度：$\Delta S_{min} = 2kT_{min}/A_e = 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 0.297/2.67 = 0.031$ sfu

4.2　计算机系统及软件功能

(1)用 4 路 A/D 采集监测电压 V_m、直流输出电压 V_{dc}、交流输出电压 V_{ac} 和对数放大器输出电压 V_{log}。根据 V_m 值控制步进衰减器，令接收机处于合理工作状态。根据人工输入的‘S’(观测太阳)和‘B’(观测背景)确定 V_{dc} 和 K 因子是 V_{dcs}、K_s 还是 V_{dcb}、K_b。进行数字积分时，标准的积分时间为 1 ms 和 1 s 两种，两种数据可同时显示和记录。升级改造后的 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计的观测软件界面如图 4。

(2)进行预处理，如：

① 步进衰减器的跳变式记录变为连续渐变式记录；

② 显示实时的太阳流量；

③ 显示全天太阳流量变化；

④ 对数值变换为比值显示。

(3)数据存储：可同时存储积分时间为 1 ms(.nwm)和 1 s(.nws)的观测数据。采用整型数据存储，包括 64 字节文件头和观测数据，每 2 字节表示一个采样点(观测数据点)。毫秒级文件是每 10 s 存一个文件，每个文件 20 KB，每天的数据量约为 56 M，秒级文件每天的数据量约为 60 KB（按每天观测 8 h 计算）。

(4)数据发布：望远镜从 1977 年开始观测，2010 年进行设备的升级改造，其数据已连续积累三十多年，定期发布在国家天文台太阳数据中心(http://csrh.bao.ac.cn/data/)，用户可自由下载。

① http://www.spaceweather.ca/solarflux/sx-5-flux-eng.php?year=2011

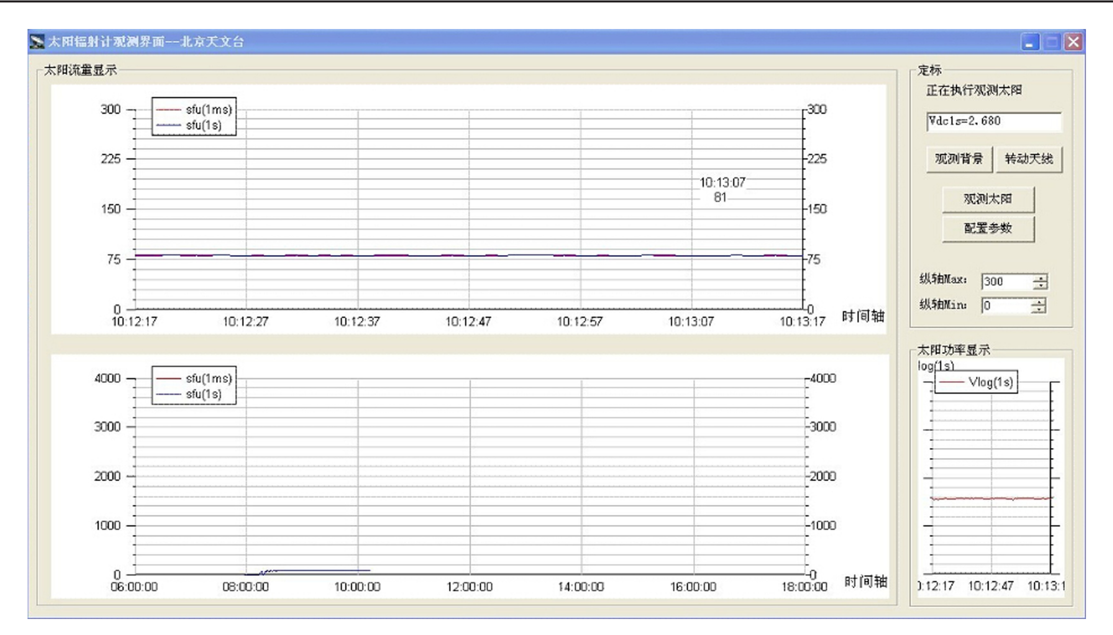


图 4 观测软件界面

Fig. 4 The interface of the observation software

5 观测结果

利用经过上述升级改造后的 2 840 MHz 太阳射电辐射流量计对太阳进行观测，成功观测到 2011 年 2 月 15 日 X2.2 级大耀斑爆发(图 5)。该事件是一个典型的长持续(近 1 个小时)复杂型(多峰)射电爆发事件。复杂的多峰结构对应同频率的频谱观测中有斑马纹、脉动、慢漂移等丰富的精细结构[11]。

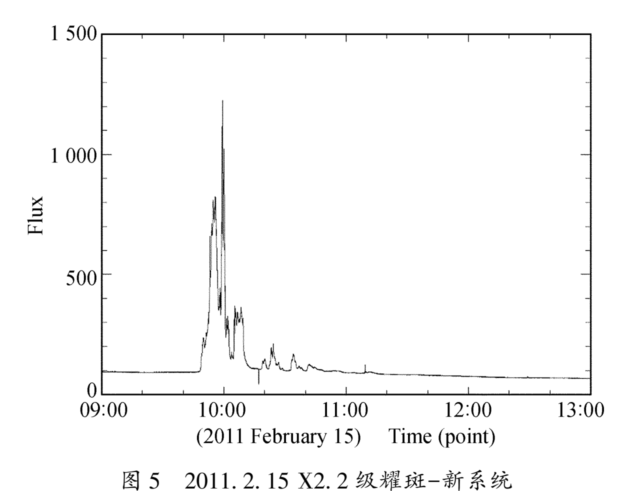


图 5 2011.2.15 X2.2 级耀斑-新系统

Fig. 5 The X2.2 solar flareon Feb. 15, 2011 observed with the new system

6 结 论

本文介绍了国家天文台怀柔观测站 2 840 MHz 太阳辐射流量计的升级改造。新设备采用了 K 因子辐射计及新的定标技术，对微波前端、模拟接收系统、数字采集系统、存储显示系统也进行了升级改造。通过设备的升级改造，改进了天线的观测性能，其数据对研究耀斑物理动力学过程、能量释放、太阳活动规律及太阳长期演化行为等具有重要意义，为相关研究提供了丰富的观测依据。

致谢：衷心感谢设备安装、调试过程中南京射电天文技术研究所吴枫、河海大学沈亚明等的大力支持和帮助。

参考文献：

[1] 赵仁扬，金声震，傅其骏. 太阳射电微波爆发 [M]. 北京：科学出版社，1997.

[2] Wang Jialong, Zong Weiguo, Le Guiming, et al. Predicting the start and maximum amplitude of solar cycle 24 using similar phases and a cycle grouping [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2009, 9(2): 133-136.

[3] Tan Baolin, Cheng Zhuo. The mid-term and long-term solar quasi-periodic cycles and the possible relationship with planetary motions [J]. Astrophysics & Space Science, 2013, 343(2): 511-

521.

[4] 彭树生. 提高微波辐射计绝对测量精度的研究 [D]. 南京：中国科学院紫金山天文台, 1995.

[5] 董亮, 何乐生, 施硕彪. 太阳射电 800~975 MHz 波段高动态范围模拟接收机的研制 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2014, 11(2): 111-117.
Dong Liang, He Lesheng, Shi Shuobiao. Design of a high dynamic range analog receiver for solar radio observation in 800-975MHz [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2014, 11(2): 111-117.

[6] 杨精一. 微波辐射计定标方程研究 [J]. 长春光学精密机械学院学报, 2001, 24(3): 21-24.
Yang Jingyi. Research of the establish standard of equation with the microwave radiator [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2001, 24(3): 21-24.

[7] 刘丽佳, 刘彬, 董亮, 等. 云南天文台 40 米射电望远镜 S 波段总流量观测系统研制和测试 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2013, 10(2): 134-141.
Liu Lijia, Liu Bin, Dong Liang, et al. Development and testing of an S-band flux measurement system for the 40m radio telescope of the Yunnan Observatory [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2013, 10(2): 134-141.

[8] 彭树生, 殷兴辉, 徐之材. 五毫米大气遥感微波辐射计 [J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(2): 38-41.
Peng Shusheng, Yin Xinghui, Xu Zhicai. 5mm microwave radiometer for atmosphere remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1995, 10(2): 38-41.

[9] 吴礼. 毫米波辐射计特性参数与性能测试研究 [D]. 南京：南京理工大学, 2004.

[10] 王威, 窦玉江, 颜毅华, 等. CSRH 灵敏度分析 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2013, 10(1): 22-25.
Wang Wei, Dou Yujiang, Yan Yihua, et al. Analysis of the sensitivity of the CSRH [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2013, 10(1): 22-25.

[11] Tan Baolin, Yan Yihua, Tan Chengming, et al. Microwave zebra pattern structures in the X2.2 solar flare on 2011 February 15 [J]. Astrophysical Journal, 2012, 744(2): 1-10.

Upgrading the Solar Radio Flux Telescope with the Frequency of 2.84GHz

Du Jing[1,2], Yan Yihua[1], Xu Zhicai[3], Yin Xinghui[4], Wang Wei[1], Tan Chengming[1], Chen Zhijun[1]

(1. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China, Email: jdu@nao.cas.cn; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Institute of Radio Astronomical Technology, Nanjing 210024, China; 4. Hehai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The solar radio flux telescope with the frequency of 2.84GHz is an important instrument to monitor and forecast the solar activities by collecting and analyzing the solarradio fluxes. At the beginning of the 21st century, the regular monitoring by using such an instrument was stopped due to ageing of most components and difficult to repair during the long running. Now we have updated the microwave front-end, the analog receiving system, the digital acquisition system, the storage and display system, and the 2m parabolic antenna to the system. In the new system we adopted a radiometer for k-factor measurement and a new self-calibration technique which makes the calibration more efficient and accurate. At present, the upgraded solar radio flux telescope working at 2.84GHz has achieved some good results.

Key words: Radio astronomy; Solar radio flux telescope; Flux measurement; Radiometer